

Nonna Saarinen

**MOBIILIMITTAUKSET LIIKENTEEEN  
PIENHIUKKASTEN PITOISUUKSISTA  
POHJOISMAIDEN MOOTTORITEILLÄ**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Heinäkuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Nonna Saarinen: Mobiilimittaukset liikenteen pienhiukkasten pitoisuuksista Pohjoismaiden moottoriteillä

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Teknis-luonnontieteellinen

Heinäkuu 2019

---

Työn tarkoituksena oli selvittää hiilidioksidin sekä pienhiukkasten pitoisuuksia Pohjoismaiden moottoriteillä. Työssä analysoitiin Matlab-ohjelmiston avulla vuosina 2015 ja 2017 mitattuja dataa, jotka oli kerätty Tampereen yliopiston Aerosolifysiikan laboratorion mobiililaboratoriolla. Mittaukset oli toteutettu Ruotsissa, Suomessa ja Tanskassa oikeissa ajo-olosuhteissa moottoriteillä reaaliaikaisina jahtausmittauksina.

Tavoitteena oli saada selville hiukkasten lukumäärällinen päästökerroin hiilidioksidin sekä poltettujen polttoainekilojen suhteen ja vertailla eri vuosille laskettuja päästökertoimia. Lisäksi saatua tuloksia vertailtiin samankaltaisiin aiemmin toteutettuihin tutkimuksiin niin kokonaishiukkaspitoisuuden kuin päästökertoimienkin suhteen. Tavoitteena oli myös pohtia tässä tutkimuksessa tutkittujen vuosien välisten mahdollisten erojen syitä, kuten vuosina 2014–2015 voimaan astunutta Euro 6 -päästöluokitusta sekä eroja ja yhtäläisyyksiä mittausten aikana vallinneissa olosuhteissa.

Lopuksi pohdittiin vielä mahdollisia tutkimuksen kehityskohteita sekä sitä, miten tätä tutkimusta voisi laajentaa tai miten siitä voisi hyötyä enemmän. Lisäksi pohdittiin mitä virhelähteitä tutkimus sisälsi tai saattoi sisältää ja miten niiltä voisi välttyä seuraavilla mittauserroilla.

Avainsanat: hiilidioksidi, moottoritiet, pienhiukkaset, Pohjoismaat, päästökertoimet, PM<sub>2.5</sub>

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Nonna Saarinen: Mobile measurements of fine particles concentration on the motorways of Nordic countries  
Bachelor of Science Thesis  
Tampere University  
Science and Engineering  
July 2019

---

Keywords: carbon dioxide, motorways, fine particles, Nordic countries, emission factors, PM<sub>2.5</sub>

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

## ALKUSANAT

Tämä työ on toteutettu Tampereen yliopiston Aerosolifysiikan laboratorion keräämästä datasta, ja haluan kiittää Aerosolifysiikan laboratoriota mahdollisuudesta toteuttaa tämä työ. Haluan myös kiittää professori Miikka Dal Masoa avusta työn toteuttamisessa sekä työn kanssa esiintyneiden ongelmien selvittelystä. Erityisesti tahdon kiittää äitiäni oikoluvusta ja kieliasun silottelusta.

Tampereella, 23. heinäkuuta 2019

Nonna Saarinen

# SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto . . . . .	1
2	Liikenteen pienhiukkaset . . . . .	3
2.1	Vaikutukset . . . . .	4
2.1.1	Pienhiukkaset elimistössä . . . . .	5
2.1.2	Pienhiukkaset ilmakehässä . . . . .	6
2.2	Pienhiukkasten mittaaminen . . . . .	7
2.3	Taustahiukkaset . . . . .	9
3	Mittaukset ja menetelmät . . . . .	10
3.1	Mittausjärjestelyt ja olosuhteet . . . . .	10
3.2	Mobiililaboratorio ja mittalaitteet . . . . .	10
3.3	Tulosten käsittely . . . . .	12
3.4	Päästökertoimien laskenta . . . . .	13
4	Pienhiukkaset Pohjoismaiden moottoriteillä . . . . .	16
4.1	Hiilidioksidi- ja hiukkaspitoisuudet . . . . .	16
4.2	Päästökertoimet . . . . .	18
5	Yhteenveto . . . . .	21
	Lähteet . . . . .	24

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

DALY	Menetetyt toimintakykyiset elinvuodet (engl. Disability Adjusted Life Years)
ELPI	Sähköinen alipaineimpaktori (engl. Electrical Low Pressure Impactor)
Euro 6	Euro-päästöluokitusten uusin luokka (astunut voimaan 2014–2015)
NTP	Normaaliolosuhteet, joissa on määritelty $T = 293,15 \text{ K} / 20^\circ\text{C}$ ja $P = 101\,325 \text{ Pa}$ (engl. Normal Temperature and Pressure)
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (engl. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
PM <sub>2.5</sub>	Pienhiukkaset joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 2,5 mikrometriä (engl. Particulate Matter 2.5)
WHO	World Health Organization

# 1 JOHDANTO

Suomessa ja Ruotsissa liikenteen päästöjen aiheuttamat pienhiukkaspitoisuudet ( $PM_{2.5}$ ) ovat vuosikeskiarvoltaan alle  $10 \mu g/m^3$ , mikä on Euroopan mittapuulla matalimmalla päästötasolla [1], ja täyttää WHO:n asettamat ohjeistukset pienhiukkasten maksimikonsentraatiosta [2]. Tanskassa liikenteen päästöjen aiheuttamien pienhiukkaspitoisuuksien vuosikeskiarvo asettuu välille  $10\text{--}20 \mu g/m^3$ , mutta on silti maltillinen verrattuna esimerkiksi Italian tai Puolan vastaaviin arvoihin [1]. Kuitenkin myös vähäisillä pienhiukkaspitoisuuksilla on monia vaikutuksia ihmisen terveyteen, eikä niille ei ole voitu määritellä alarajaa, jonka alapuolella haitallisia vaikutuksia terveyteen ei esiintyisi. Terveydelle vaarallisimpina pidetään aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle  $2,5 \mu m$ :n hiukkasia eli pienhiukkasia, jotka kykenevät tunkeutumaan hengityselimistöön ja kaikista pienimmät hiukkaset jopa verenkiertoon. Pitkäaikainen altistus pienhiukkasille lisää riskiä sairastua ja kuolla sekä hengityselin- ja verisuonisairauksiin että keuhkosityöpään, ja pitkäaikaisen altistuksen alle  $2,5 \mu m$ :n hiukkasille on havaittu aiheuttavan kuolleisuuden riskin nousua  $6\text{--}13 \%$  jokaista  $10$  pienhiukkasmikrogrammaa per kuutiometri kohti. [3]

Pienhiukkasilla on ihmisten terveyden lisäksi negatiivisia vaikutuksia ympäristöön sekä ilmastoon. Ihmislähtöisillä pienhiukkasilla on sekä ilmastoa lämmittävä että viilentävä vaikutus, mutta kasvihuoneilmiötä kiihdyttävä, lämmittävä vaikutus on paljon kauaskantoisempi kuin viilentävä. Vaikka määrällisesti suurin osa maapallon hiukkaspäästöistä tulee luontaisista lähteistä, ihmisten tuottamat hiukkaspäästöt keskittyvät teollisuus- ja asutuskeskuksiin ja näillä alueilla käsittävätkin valtaosan kokonaispäästöistä. Maapallon lämpötilaan vaikuttamisen lisäksi pienhiukkaset huonontavat näkyvyyttä ja ovat osasyllisiä otsonikatoon. [4, s. 304–314]

Liikenteen pienhiukkaspäästöjen tutkiminen on tärkeää myös asutuskeskusten ulkopuolella, sillä ajoneuvojen kuljettajat altistuvat liikenteessä näille pienhiukkasille. Vaikka autojen sisäilma filttäroidään ulkoilmasta, kaikki hiukkaset, ja varsinkin pienhiukkaset, eivät poistu suodatuksen aikana [5]. Pienhiukkaset myös leviävät moottoriteiltä ympäristöön ja aiheuttavat hiukkaskonsentraatioiden kasvua muuallakin kuin asutuskeskuksissa.

Tämä työ keskittyy pääasiassa liikenteen päästöihin muualla kuin asutuskeskuksissa, ja on yksi harvoja tällaisiin päästöihin keskittyviä tutkimuksia. Työn tarkoituksena on tarkastella liikenteen hiukkaspäästöjä Pohjoismaiden moottoriteillä ja vertailla eri vuosilta saatuja tuloksia keskenään, sekä vertailla tutkimuksen tuloksia myös samankaltaisiin aiemmin toteutettuihin tutkimuksiin. Tavoitteena on lisäksi määrittää pienhiukkasten lukumäärällinen päästökerroin hiilidioksidiin sekä poltettuihin polttoainekiloihin nähden. Ver-

tailussa keskitytään erityisesti siihen, miten autokannan uudistuminen esimerkiksi Euro-päästöluokitusten myötä on mahdollisesti muuttanut moottoriteillä havaittuja pienhiukkas-pitoisuuksia ja päästökertoimia. Työssä käytetty data on kerätty Tampereen yliopiston Ae-rosolifysiikan laboratorion mobiililaboratoriolla kesäkuussa 2015 ja toukokuussa 2017.

Tämän työn luvussa 2 kerrotaan yleisesti liikenteen pienhiukkasista ja niiden vaikutusis-ta ihmiseen ja ympäristöön. Lisäksi tutustutaan pienhiukkasten mitattaviin ominaisuuksiin sekä taustahiukkasiin. Tämän jälkeen luvussa 3 tutustutaan käytettyihin menetelmiin se-kä mobiililaboratorioon ja sen mittalaitteisiin, joilla varsinainen mittaus on suoritettu. Lu-vussa 4 esitellään tulokset ja pohditaan yhtäläisyyksiä sekä eroja aiemmin suoritettuihin samankaltaisiin tutkimuksiin.

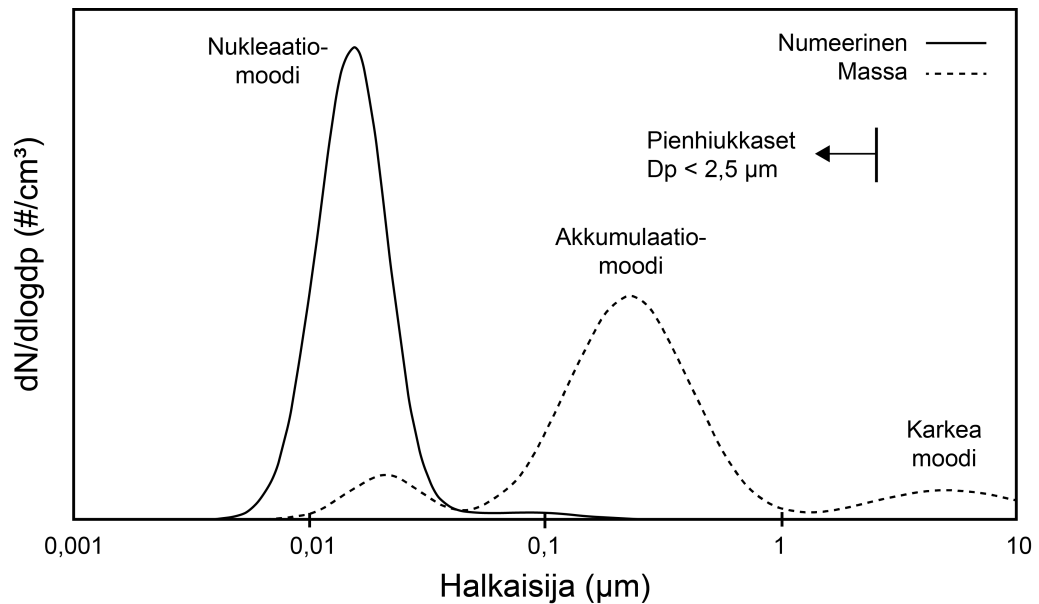


## 2 LIIKENTEEN PIENHIUKKASET

Liikenteen hiukkaspäästöt ovat summa liikenteessä olevien erilaisten ja erilaista polttoainetta käyttävien ajoneuvojen päästöistä sekä katupölystä. Ajoneuvon emittoimiin hiukkasiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa ajoneuvon ikä, moottorin kunto sekä käytettävä polttoaine. Dieselmoottorilliset ajoneuvot aiheuttavat suurimman osan liikenteen päästöistä, sillä niiden aiheuttamat hiukkasemissiot ovat 10–100 kertaa suuremmat kuin kipinäsytytysmoottorillisten ajoneuvojen [6].

Liikenteen emittoimat hiukkaspäästöt voidaan jakaa kolmeen eri moodiin eli kokoluokkaan aerodynaamisen kokonsa perusteella. Ensimmäinen moodi eli nukleaatiomoodi käsittää noin alle 50 nm:n kokoiset hiukkaset, toinen moodi eli akkumulaatiomoodi noin 50–1000 nm:n kokoiset hiukkaset ja viimeinen moodi eli karkea moodi 1–50 µm:n kokoiset hiukkaset. Liikenteen hiukkasista suurin numeerinen osuus (yli 90 %) on nukleaatiomoodin hiukkasia, mutta suurin massallinen osuus (noin 60–95 %) keskittyy akkumulaatiomoodin hiukkasiin. [6] Ajoneuvojen hiukkaspäästöjakaumaa on mallinnettu kuvassa 2.1 sekä lukumäärän että massan suhteen. Pienhiukkasiksi kutsutut hiukkaset käsittävät aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle 2,5 nm:n hiukkaset, ja tässä tutkimuksessa keskitytään näihin hiukkasiin.

Liikenteessä syntyvistä pienhiukkasista nukleaatiolla syntyvät hiukkaset ovat suurimmaksi osaksi sulfaatteja sekä hiilivetyjä, jotka muodostuvat kaasuista ajoneuvon moottorissa tai pakokaasujen laimentuessa ja jäähtyessä. Akkumulaatiomoodin hiukkaset sen sijaan ovat suurimmalta osin suoraan palamisesta muodostuneita hiilipitoisia nokihiukkasryppäitä eli *nokiagglomeraatteja*. [6] Tämän takia akkumulaatiomoodia kutsutaan ajoneuvojen päästöjen yhteydessä yleensä nokimoodiksi. Karkean moodin hiukkaset koostuvat lähinnä akkumulaatiomoodin hiukkasista, jotka ovat jääneet sylinterin tai pakoputken eri osiin ja kasvaneet halkaisijaltaan suuremmaksi kiertäessään moottorin osien läpi uudelleen [6]. Karkeaan moodiin kuuluu myös katupöly, joka koostuu muun muassa hiekoitus-hiekasta, tienpinnan mineraaleista, ajoneuvojen moottoreista irronneista metalleista sekä orgaanisista hiukkasista, kuten homeesta ja siitepölystä. Nämä karkean moodin hiukkaset voivat olla terveydelle yhtä haitallisia kuin pienhiukkasetkin, jos ne kykenevät tunkeutumaan hengitysteihin. [7]



**Kuva 2.1.** Liikenteen hiukkaspäästöjen numeerinen pitoisuusjakauma sekä massapitoisuusjakauma lähdettä [6] mukaillen

## 2.1 Vaikutukset

Pienhiukkasilla on monia vaikutuksia yhteiskuntaamme. Merkittävimpiä vaikutuksia ovat pienhiukkasten aiheuttamat terveyshaitat sekä vaikutukset ilmastoon.

Useissa tutkimuksissa on todistettu pienhiukkasten olevan vaarallisia terveydelle. Alankomaissa tehdyssä tutkimuksessa [8] havaittiin yhteys verisuoni- ja hengitystiesairauksista johtuvan kuolleisuuden ja pitkäaikaisen liikenteen päästöille altistumisen välillä. Yhdysvalloissa tehdyissä samankaltaisissa tutkimuksissa [9, 10] ilmansaasteet ja pienhiukkaset on linkitetty yleiskuolleisuuteen sekä vahvasti hengitystie- ja verisuonikuolleisuuteen. Vaikka pienhiukkaset on linkitetty kuolleisuuteen ja terveysongelmiin, ovat pienhiukkasperäiset menetetyt toimintakykyiset elinvuodet (DALY) sekä kuolemat olleet Pohjoismaissa laskussa 1990-luvulta asti [11].

Ilmakehän pienhiukkasilla on myös merkittäviä vaikutuksia ilmastoon ja sen lämpenemiseen. Vaikka suurin osa pienhiukkasista planeetallamme syntyy luonnollisesti ilman ihmisen toimia, on ihmisperäisillä aerosoleilla silti huomattavia vaikutuksia ilmastoon. [4, s. 312–313] Esimerkiksi tulivuorenpurkaus saattaa nostaa hetkellisesti ilmakehässä havaittavia pitoisuuksia laajalla alueella yli satakertaisiksi [4, s. 312], mutta toisaalta teollisen vallankumouksen alusta ihminen on toimillaan nostanut pienhiukkaspitoisuuksia Euroopassa keskimäärin  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , eli lähes viisitoistakertaisiksi [12]. Pienhiukkaset vaikuttavat lisäksi näkyvyyteen ja etenkin suurissa kaupungeissa haittana on aerosoleista muodostunut *savusumu*.

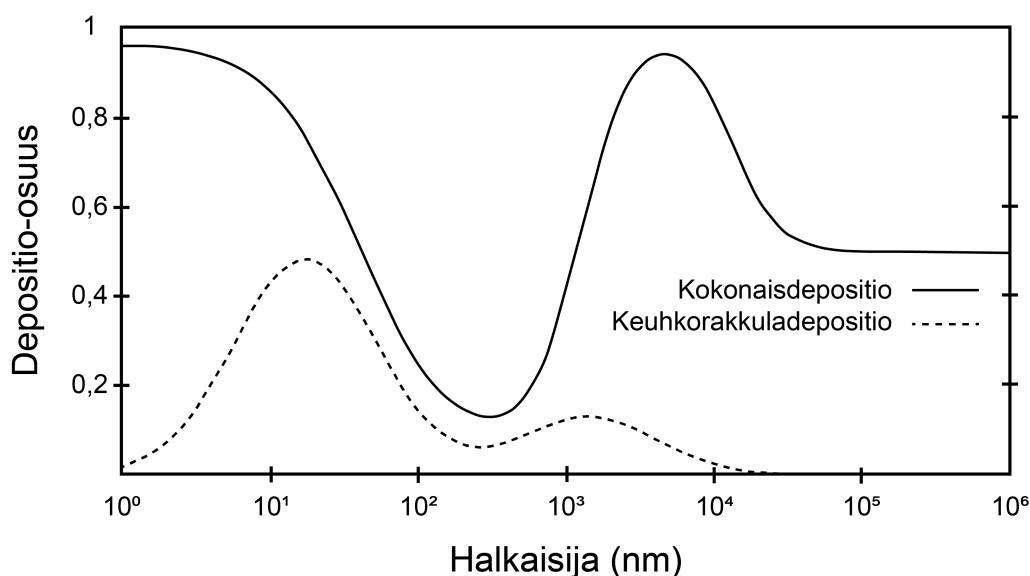
### 2.1.1 Pienhiukkaset elimistössä

Pienhiukkaset ovat terveydelle vaarallisia pienen kokonsa takia, sillä ne kykenevät kulkeutumaan hengitysteiden eri osiin aiheuttaen sairauksia sekä ennenaikaisen kuolleisuuden nousua [3]. Arvioitu ihmisperäisten pienhiukkasten aiheuttama kuolleisuus keuhko- ja verisuonisairauksiin on noin 3,5 miljoonaa henkilöä vuosittain ja kuolleisuus keuhkosityöpään noin 220 000 henkilöä vuosittain [12]. Pienhiukkasten vaikutus terveyteen riippuu siitä, mihin osaan hengityselimiä ne jäävät ja mistä ne koostuvat. Tätä varten on tarkasteltava, miten hiukkasten kulkeutuminen hengitysteihin tapahtuu.

Ihmisen hengitystiet voidaan jakaa kolmeen osaan, joista ensimmäinen on pään alueen hengitystiet eli ylähengitystiet. Tähän osioon kuuluvat nenä, suu, nielu sekä kurkunpää. Seuraava osio on keuhkohengitystiet eli alahengitystiet, joihin kuuluvat henkitorvi sekä keuhkoputket. Viimeiseen osioon kuuluvat keuhkorakkulat, joissa tapahtuu hapen siirtyminen verenkiertoon ja hiilidioksidin poistuminen verenkierrosta. Pienhiukkasten kulkeutuminen hengitysteiden alueille riippuu suuresti hiukkasten aerodynaamisesta halkaisijasta, ja usein pienemmät hiukkaset pääsevät tunkeutumaan syvemmälle hengitysteihin, isojen hiukkasten jäädessä ylemmäs hengitysteihin osuessaan ilmatiehyiden seinämiin. Pienimmät hiukkaset kulkeutuvat ohuisiin ilmatiehyisiin, joissa hiukkasten kulkunopeus hidastuu ja ne laskeutuvat ilmatiehyiden seinämille. Kaikista pienimmistä hiukkasista (aerodynaaminen halkaisija alle 10 nm) suurin osa suodattuu kuitenkin pois jo pään ilma- teissä, sillä niiden diffuusiokerroin on korkea. [4, s. 233–242]

Dieselhiukkasten keuhkodepositiota käsitelleessä tutkimuksessa [13] selvitettiin nukleaatio- sekä akkumulaatiomoodien depositiokertoimia niin haihtuville kuin ei-haihtuville pienhiukkasille. Tutkimuksessa huomattiin, että nukleatiomoodin hiukkasilla on numeerisesti korkein deposoitumisaste keuhkojen alueelle, mutta massadepositioltaan nukleatio- sekä akkumulaatiomoodi ovat melko tasoissa. Huomioitavaa on kuitenkin se, että pienhiukkasten ei tarvitse päästä elimistöön hengitysteitä pitkin aiheuttaakseen terveyshaittoja. Altistus pienhiukkasille voi aiheuttaa sisäisten haittojen lisäksi esimerkiksi silmien tai ihon ärsytystä [2, s. 62].

Pienhiukkasten poistumisnopeus elimistöstä on myös tärkeä tekijä niiden terveysvaikutuksia huomioidessa. Ylä- ja alahengitysteihin jääneet hiukkaset poistuvat useimmiten nopeasti, jopa muutamissa tunneissa ilmateitä suojaavan liman poistuessa kehosta. Keuhkorakkuloissa ei sen sijaan ole suojaavaa limaa, sillä kaasujen vaihto tapahtuu tällä alueella. Keuhkorakkuloihin kulkeutuneiden hiukkasten poistumisaika onkin huomattavasti pidempi – kuukausia tai jopa vuosia – kuin ylemmäs hengitysteihin depositoituneiden hiukkasten. [4, s. 235] Terveydelle vaarallisimpia ovat noesta koostuvat pienhiukkaset, jotka kuljettavat keuhkorakkuloihin karsinogeenisiä yhdisteitä, kuten PAH-yhdisteitä sekä metalleja ja epäorgaanisia suoloja [3]. Nämä yhdisteet kykenevät imeytymään keuhkorakkuloissa verenkiertoon suojaavan limakerroksen puuttuessa.



**Kuva 2.2.** Pienhiukkasten hengityselindepositio lähdettä [4, s. 240] mukaillen

WHO:n mukaan [2, s. 65] ihmiset altistuvat liikenteessä kohonneille määrille ilmansaasteita. Autoilijat altistuvat usein suuremmalle konsentraatiolle hiilimonoksidia, typpioksideja sekä nokea kuin pyöräilijät ja jalankulkijat. Hapenotto kuitenkin lisääntyy fyysisessä rasituksessa, joten todellisuudessa ero autoilijoiden sekä pyöräilijöiden ja jalankulkijoiden hengittämän hiukasmäärän välillä on pieni. Liikenteen pienhiukkasille altistuminen on linkitetty esimerkiksi tunnin sisällä altistumisesta tapahtuvaan sydäninfarktiin. Tavalisin syy infarktiin on autossa matkustaminen, mutta myös joukkoliikenteessä tapahtuva altistus on linkitetty sydäninfarktin riskiin. [14]

Kaiken kaikkiaan pienhiukkaset aiheuttavat monenlaisia haittoja terveydelle. Hetkellinen altistus lisää kuolleisuuden riskiä, keuhkoihin sekä verisuoniin liittyviä terveydenhoidollisia toimenpiteitä ja lääkitystä, työ- tai koulupoissaoloja sekä akuutteja oireita, kuten yskmistä, limaneritystä ja hengitystieinfektioita. Pitkäaikainen altistus pienhiukkasille aiheuttaa lisäksi kuolleisuutta hengityselin- sekä verisuonisairauksiin, kroonisten hengityselinsairauksien esiintymistä, sikiön kasvurajoitteisuutta sekä kasvanutta riskiä sairastua keuhkosyöpään. [2, s. 89] Vaikka pienhiukkasten terveyshaitat koskettavat kaikkia, suurimassa vaarassa ovat lapset, joiden keuhkot ovat vasta kehittymässä, sekä vanhukset ja jo valmiiksi hengityselin- tai verisuonisairauksista kärsivät henkilöt [3].

### 2.1.2 Pienhiukkaset ilmakehässä

Ilmakehässä olevat pienhiukkaset vaikuttavat niin maan heijastavuuteen eli *albedoon*, säteilytasapainoon kuin pilvien koostumukseenkin. Kaikki nämä ovat kytköksissä globaaliin pintalämpötilaan. Esimerkiksi tulivuorenpurkauksissa syntyvät hiukkaset viilentävät ilmastoa, sillä ilmakehässä ne heijastavat auringon valoa pois tehokkaammin kuin norma-

lit pilvet. Pienhiukkasten lisääntyminen muuttaa myös normaalien pilvien ominaisuuksia, ja suurempi hiukkaskonsentraatio pilvien tiivistymisytiminä kasvattaa niiden heijastavuutta sekä elinikää. Ilmakehässä olevat aerosolit heijastavat auringonvaloa pois myös suoraan, muodostamatta pilviä. [4, s. 312–313, 15] Pienhiukkaset vaikuttavat myös näkyvyyteen, sillä vaikka jo pelkästään ilmakehän molekyylit rajoittavat näkyvyyttä, ilmakehässä olevat aerosolit heikentävät sitä huomattavasti. Varsinkin halkaisijaltaan  $0,1\text{--}1,0\text{ }\mu\text{m}$ :n kokoiset pienhiukkaset alentavat havaittavaa kontrastia, mikä vaikeuttaa näkemistä. [4, s. 364–365]

Pilvien muodostuessa suuret hiukkaskonsentraatiot vaikuttavat pilvien pisarakokoon. Korkeammilla hiukkaskonsentraatioilla pilvipisarot ovat pienempiä, mikä vaikuttaa sateiden syntyyn. Matalan hiukkaskonsentraation pilvissä pisarat kasvavat suuremmiksi, jolloin painovoima vaikuttaa niihin yhä vahvemmin ja lopulta syntyy sadetta. Pienipisarisissa pilvissä näin ei käy, joten sade ei pysty puhdistamaan ilmaa hiukkasista, ja hiukkaskonsentraatio kasvaa edelleen. Tämän takia hiukkassaastuneet alueet eivät puhdistu sateen avulla, joka on yksi tärkeistä etenkin suurten hiukkasten poistumismekanismeista ilmakehässä. [15] Yleensä suuret hiukkaset poistuvatkin ilmakehästä paljon pieniä hiukkasia nopeammin, jopa muutamissa tunneissa. Pienet hiukkaset puolestaan saattavat säilyä ilmakehässä useita päiviä. [4, s. 305]

Nokihiukkaset, joita liikenne tuottaa huomattavasti, alentavat puolestaan lumen ja jään heijastuskykyä. Heijastuskyvyltään huonommat jäätiköt sekä lumimassat sulavat nopeammin, ja siten kiihdyttävät ilmaston lämpenemistä. Nokihiukkaset myös absorboivat näkyvän valon aallonpituuksia tehokkaasti, mikä nostaa globaalia pintalämpötilaa entisestään. Noki onkin nostettu toiseksi merkittävämmäksi ihmisperäiseksi ilmastomuutoksen kiihdyttäjäksi heti hiilidioksidin jälkeen. [15]

Ilmakehässä olevat aerosolit vaikuttavat myös pinnalle saapuvan auringon säteilyn määrään. On osoitettu, että suuret hiukkaskonsentraatiot aiheuttavat säteilyn himmenemistä. Tämä on linkitetty pilvien ominaisuuksiin, mutta myös suoraan aerosoleista johtuvaan säteilyn heijastumiseen. [15] Toisaalta ilmakehän aerosolit ovat osana näyttävisissä luonnonilmiöissä, kuten värikkäissä auringonlaskuissa, sateenkaarissa tai halo-ilmiöissä sirotavien ominaisuuksiensa vuoksi [4, s. 349].

## 2.2 Pienhiukkasten mittaaminen

Yksittäisten pienhiukkasten olennaisimpia ja tavallisimpia mitattavia ominaisuuksia ovat koko, muoto sekä tiheys. Tärkeimpiä tekijöitä ympäristöhaittojen puolesta on kuitenkin hiukkaskonsentraatio. Useimmiten mitataan hiukkasten massakonsentraatiota, eli hiukkasten massaa tilavuusyksikköä kohti, mutta tämä ei kerro koko totuutta, sillä pienimmät hiukkaset ovat vain murto-osa kokonaismassasta, vaikka niiden suhteellinen määrä olisiikin suuri. [4, s. 8–11] Esimerkiksi liikenteen aiheuttamissa pienhiukkaspäästöissä tämä näkyy hyvin, sillä suurin massakonsentraatio keskittyy akkumulaatiomoodiin eli noin

50–1000 nm hiukkasiin, kun taas suurin numeerinen konsentraatio keskittyy nukleatiomoodin eli alle 50 nm hiukkasiin [6]. Tämän vuoksi usein mitataan myös numeerista konsentraatiota, eli hiukkasten määrää tilavuusyksikköä kohti [4, s. 8–11].

Hiukkasten terveyshaittoja arvioidessa sen sijaan ehkä tärkeimpiä mitattavia suureita on hiukkasten pinta-ala, varsinkin jos hiukkaset ovat pyöreitä ja liukenemattomia tai vähäliukoisia. Tämä selittyy sillä, että liukenemattomien hiukkasten tapauksessa ainostaan niiden pintakerros on vuorovaikutuksessa elimistön kanssa. Liukenevia hiukkasia mitatessa puolestaan olennaisia ovat hiukkasen massa sekä tilavuus, sillä hiukkasten liuetessa elimistöön kaikki niiden sisältämä materiaali päätyy kontaktiin elimistön kanssa. Hiukkasten numeerista konsentraatiota kannattaa mitata silloin, kun niiden määrä on niin suuri, että ne kykenevät luomaan keuhkoihin ylikuormitustilan, jossa keuhkot eivät enää kykene poistamaan hiukkasia tehokkaasti. Lisäksi lukumäärän mittaaminen on tehokas keino arvioidessa kuitumaisten hiukkasten terveyshaittoja. [16] Tässä tutkimuksessa on kuitenkin keskitytty vain hiukkasten numeerisen konsentraation selvittämiseen ja tutkimiseen huolimatta numeerisen konsentraation ja terveyshaittojen välisestä heikosta korrelaatiosta.

Liikenteen pienhiukkasia mitattaessa yksi tärkeä ominaisuus on myös päästökerroin (engl. *Emission factor*). Päästökertoimilla kuvataan pienhiukkasten vapautumista haluttua suuretta kohti, esimerkiksi poltettua polttoainekiloa, ajan yksikköä tai kilometriä kohti. Hiukkasten päästökerroin voidaan laskea kokonaislukumäärää tai kokonaismassaa kohden. Tässä tutkimuksessa on keskitytty pienhiukkasten lukumäärällisten päästökertoimien selvittämiseen hiilidioksidipitoisuuksia sekä poltettuja polttoainekiloja kohti.

Useissa ajoneuvojen päästöihin liittyvissä tutkimuksissa oikeita ajo-olosuhteita simuloidaan dynamometrissä ajetuilla testeillä. Tällöin saadut tulokset saattavat poiketa suurestikin todellisista ajoneuvojen päästöistä, jolloin ei pystytä täysin arvioimaan millaisia riskejä päästöihin liittyy, miten päästöjä voitaisiin vähentää ja millaisia päästökertoimia eri ajoneuvoilla todellisuudessa on. Erot dynamometreillä ja reaali maailmassa suoritetuissa tutkimuksissa johtuvat erilaisista olosuhteista. Reaali maailmassa ajoneuvojakauma on laajempi kuin mitä laboratoriotesteihin on mahdollista saada. Ajoneuvojen tuottamat hiukkaspäästöt myös vuorovaikuttavat ilmassa jo olevien hiukkasten kanssa ja näin ollen saattavat muuttua huomattavastikin ominaisuuksiltaan. Tämän lisäksi tienpinnasta, renkaista ja jarruista irtoavat hiukkaset muokkaavat liikenteen päästöjä entisestään. Reaali maailmassa hiukkaspäästöihin vaikuttavat seikat, kuten sää, ilmankosteus ja ilman hiukkasjakauma vaihtelevat siis suuresti, ja laboratorio-olosuhteissa tällaisten vaihteluiden vaikutuksia on mahdotonta täysin kuvata. Tällöin tärkeiksi nousevat oikeilla teillä suoritettut tutkimukset, kuten tässäkin tutkimuksessa analysoidut mobiililaboratoriomittaukset. Mobiililaboratorion eri laitteilla on mitattu hiukkasten eri ominaisuuksia todellisissa ajo-olosuhteissa moottoriteillä. Käytetyt laitteet on esitelty luvussa 3. Olennaisimpia mitattavia ominaisuuksia tämän tutkimuksen kannalta ovat hiukkasten lukumääräkokojakauma eli numeerinen konsentraatio sekä hiilidioksidipitoisuus.

## 2.3 Taustahiukkaset

Luonnollisiksi taustahiukkasiksi kutsutaan ilmakehässä esiintyviä hiukkasia, joiden esiintyminen ei ole riippuvaa ihmisen toiminnasta. Näiksi taustahiukkasiksi luokitellut hiukkaset syntyvät erilaisissa luonnonilmiöissä, kuten tulivuorenpurkauksissa ja eroosion aiheuttamassa kivien rapautumisessa. Myös tuuli kuljettaa mukanaan maaperästä irronneita hiukkasia, joita irtoaa varsinkin kuivilta alueilta. Suurin osa luonnon aiheuttamista hiukkaspäästöistä on suurikokoista, nopeasti ilmasta poistuvaa aerosolia, joka ei leviä laajalle alueelle lähteeltään. Pienikokoisia hiukkasia syntyy luonnossa metsäpaloissa sekä puiden isopreeni- ja monoterpeenipäästöjen reagoidessa auringonvalon kanssa, ja nämä pienhiukkaset voivat levitä laajallekin alueelle. [4, s. 304–307]

Varsinkin ulkoilmassa suoritettavissa tutkimuksissa huomioon täytyy ottaa myös ihmisperäiset taustahiukkaset. Ihmisperäisiin taustahiukkasiin lasketaan tuulen mukana kaukokulkeutuneet hiukkaset, jotka ovat peräisin ihmisten toiminnasta, sekä alueelle ominainen taustapitoisuus, joka johtuu alueella olevista ihmisperäisistä päästölähteistä, esimerkiksi teollisuudesta tai energiantuotannosta. Tutkimuksissa taustahiukkaset huomioidaan yleensä mittaamalla jokaisella mittauskerralla myös taustahiukkasten konsentraatio, joka voidaan datan käsittelyvaiheessa ottaa huomioon. Taustahiukkasten mittaus suoritetaan mittaamalla pitoisuus esimerkiksi suuren vesialueen tai muun asumattoman alueen laidalta niin, että tuulen suunta on asumattomalta alueelta kohti mittauslaitteistoa. Varsinkin tässä tutkimuksessa on tärkeää ottaa luonnollisten taustahiukkasten lisäksi huomioon ihmisperäiset taustahiukkaset, jotka eivät ole suoraan liikenteestä peräisin. Näin voidaan olla varmoja, että saadut tulokset kuvaavat selkeästi liikenteen päästöjä, eivätkä muiden hiukkaslähteiden päästöjä.

Maailmanlaajuisesti luonnon hiukkasemissiot ovat moninkertaisia ihmisperäisiin hiukkas-päästöihin nähden. Ihmisten tuottamien pienhiukkasten vaarallisuus perustuukin niiden paikallisuuteen ja keskittymiseen asutuskeskuksiin, joissa hiukkaskonsentraatiot voivat nousta erittäin korkeiksi taustapitoisuuksiin verrattuna. [4, s. 304–305] Kuten aiemmin tässä luvussa käsiteltiin, korkeat hiukkaspitoisuudet aiheuttavat monia terveys- sekä ympäristöhaittoja. Koska hiukkas-päästöt keskittyvät tiheästi asutuille alueille, ovat ne ongelma, johon tulee kiinnittää huomiota maailmanlaajuisesti.

## 3 MITTAUKSET JA MENETELMÄT

Tässä työssä analysoidut pienhiukkasmittaukset on toteutettu 2.–4.6.2015 ja 13.5.2017 Pohjoismaiden alueella Ruotsissa, Suomessa ja Tanskassa. Mittaukset on suoritettu mobiililaboratoriolla oikeissa ajo-olosuhteissa moottoriteillä. Mittauksissa on keskitytty hiukasten lukumääräkokojakauman sekä hiilidioksidipitoisuuksien selvittämiseen.

### 3.1 Mittausjärjestelyt ja olosuhteet

Tässä työssä tutkitut mittaukset on suoritettu kahden vuoden välein. Molemmat mittaukset on suoritettu touko-kesäkuussa eli samaan vuodenaikaan, joten vuosien välisiä mahdollisia eroavuuksia voidaan vertailla. Mittaukset on suoritettu jahtausmittauksina moottoriteillä Ruotsissa, Suomessa ja Tanskassa. Reitti Kööpenhaminasta Tukholmaan on ajettu molemmilla mittauskerroilla, mutta vuonna 2015 se on ajettu Malmön kautta, kun taas vuonna 2017 Helsingborgin kautta. Vuonna 2015 on ajettu lisäksi Saksan rajalta Tanskan läpi sekä Helsingistä Tampereelle. Kuvassa 3.1 on esitetty eri vuosina ajettut reitit.

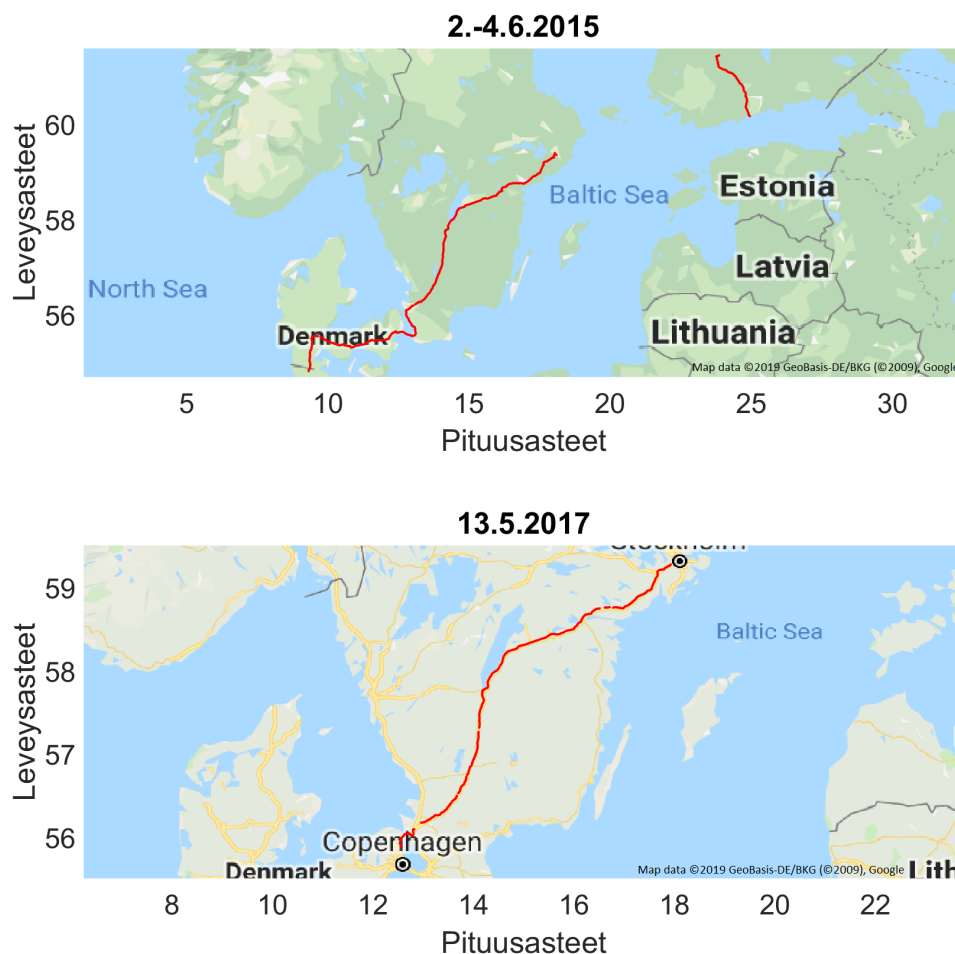
Vuonna 2015 tehdyissä mittauksissa lämpötila koko reitillä on vaihdellut välillä 7,5–22,0 astetta, keskilämpötilan ollessa 11,0 astetta. Säätila on ollut sateinen. Vuonna 2017 suoritetuissa mittauksissa lämpötila on vaihdellut välillä 5,3–18,5 astetta, keskilämpötilan ollessa 12,3 astetta ja säätilan ollessa aurinkoinen. Lämpötilat ovat siis molemmilla mittauskerroilla olleet lähellä toisiaan, mutta erot sääolosuhteissa on huomioitava tulosten vertailussa.

Mittaukset on toteutettu jahtausmittauksina, eli liikenteen seassa on ajettu mobiililaboratoriolla muiden ajoneuvojen kanssa samaa nopeutta ja ajon aikana on mitattu hiukkaspitoisuuksia sekä muita haluttuja parametrejä. Seuraavassa luvussa esitellään käytössä ollut mobiililaboratorio ja mittauksessa mukana olleet mittalaitteet.

### 3.2 Mobiililaboratorio ja mittalaitteet

Tässä työssä käytetty data on kerätty Tampereen yliopiston Aerosolifysiikan laboratorion mobiililaboratoriolla, joka on malliltaan Mercedes-Benz Sprinter A3 319 -pakettiauto. Mobiililaboratorion takatilaan on mahdollista sijoittaa useita erilaisia mittalaitteita joustavasti, ja se sopii hyvin muun muassa tässä tutkimuksessa käytettyihin reaaliaikaisiin jahtaus-





**Kuva 3.1.** Eri vuosina ajetut mittausreitit

mittauksiin. Tässä tutkimuksessa mobiililaboratoriolla on ajettu tavallista maantieajoa liikenteen seassa moottoriteillä samalla mittauksia suorittaen. Näytteenotto mobiililaboratoriolla tapahtuu tuulilasin päällä olevasta virtauskanavasta, joka on noin 2,1 metrin korkeudella maasta.

Tärkeimmät mittauksessa käytetyt mittalaitteet tämän tutkimuksen näkökulmasta ovat ELPI ja ELPI+ (Electrical Low Pressure Impactor, Dekati Ltd.) sekä hiilidioksidikonsentraatiota mitannut SIDOR-kaasuanalysaattori (SICK). Lisäksi mobiililaboratorion katolla on kiinteä sääasema, jolla saadaan reaaliaikaisesti tietoa lämpötilasta, ilmanpaineesta, auton nopeudesta, tuulen suunnasta ja nopeudesta sekä auton sijainnista koordinaatteina.

Mittauksissa käytetyt ELPI-laitteet ovat sähköisiä alipaineimpaktoreita, jotka luokittelevat hiukkasia niiden aerodynaamisen koon mukaan. ELPI kykenee mittaamaan hiukkasia 7 nanometristä aina 10 mikrometriin asti [17] ja ELPI+ 6 nanometristä 10 mikrometriin [18], joten ne kattavat hyvin tämän työn kannalta tärkeät hiukkaskokoalueet. ELPI-laitteet varaavat mitattavat hiukkaset ensin koronavarauksella, jonka jälkeen hiukkaset kerätään toisistaan erillisille impaktoriasteille inertian avulla. Hiukkasten lukumääräkokojakauma pystytään laskemaan impaktoriasteelle tulneiden varattujen hiukkasten aiheuttaman vir-



**Kuva 3.2.** Mittauksissa käytetty mobiillilaboratorio, näytteenottolinja merkitty nuolella

ran avulla. [19] Suurin ero eri ELPI-laitteiden välillä on impaktoriasteiden eli näin ollen erillisten hiukkaskokoalueiden määrä, mikä on ELPI-laitteessa 12 [20] ja ELPI+-laitteessa 14 [18]. Vuonna 2015 toteutetuissa mittauksissa hiukkasia on mitattu ELPI-laitteella, kun taas vuonna 2017 käytössä on ollut ELPI+-laite.

ELPI-laitteilla mitatessa on tärkeää huomioida, että laitteiden impaktoriasteiden luokittelemat hiukkaskokovälit perustuvat kerättävien hiukkasten efektiiviseen tiheyteen. Impaktoriasteet on suunniteltu niin, että jokainen niistä mittaa tiettyä hiukkaskokoväliä (50 % keräystehokkuudella), ja jos hiukkasten tiheys ei ole oletettu, nämä kokovälit muuttuvat. Hiukkasten lukumääräkokojakauman laskeminen impaktoriasteille tulleiden virtojen avulla perustuukin oletukselle siitä, että mitattavien hiukkasten efektiivinen tiheys on tiedossa ja pysyy mittauksen ajan muuttumattomana. [21] Tässä tutkimuksissa käytetyissä mittauksissa on oletettu hiukkasten käyttäytyvän efektiiviseltä tiheydeltään halutulla tavalla, joten tämä saattaa myös aiheuttaa virheitä saatuihin tuloksiin.

### 3.3 Tulosten käsittely

Mittauksissa saatua dataa on käsitelty ja eri laitteiden antamia dataa yhdistelty Matlab-ohjelmiston avulla. Hiilidioksidipitoisuutta mitanneen laitteen data on suoraan käytettävissä, sillä laite tallentaa tietoa hiilidioksidin pitoisuudesta yksikössä ppm (parts per million). ELPI-laitteet sen sijaan tallentavat mittausdatan impaktoriasteille tulleina virtoina, joten dataa täytyy käsitellä niin, että selville saadaan hiukkasten lukumääräkokojakaumat kulakin mittauksen ajanhetkellä.

ELPI-laitteen havaitsemien hiukkasten lukumäärä  $N$  tietyllä impaktoriasteella saadaan selvitettyä kaavalla

$$N = \frac{I}{PneQ} \quad (3.1)$$

kun tiedetään kyseiselle impaktoriasteelle tullut virta  $I$ , varaajan läpäisy  $P$ , hiukkasten keskimääräinen varaus  $n$ , alkeisvaraus  $e$  ja laitteen läpi menevä tilavuusvirtaus  $Q$ . Yhdistettäessä  $P$  ja  $n$  saadaan niin sanottu *varaustehokkuus*  $Pn$  kullekin impaktoriasteelle, jonka avulla  $N$  voidaan laskea [22, 21]. Kun tiedetään käytössä olevan ELPI-laitteen käyttämät kokoalueet, voidaan kaavalla 3.1 saadut tulokset yhdistää näihin, jolloin saadaan selville hiukkasten lukumääräkokojakauma. Huomioitavaa on, että ELPI ja ELPI+ käyttävät eri hiukkaskokoalueita, vaikka niiden mittaama kokonaisalue onkin lähes sama.

### 3.4 Päästökertoimien laskenta

Päästölähteen päästökertoimet voidaan usein laskea suhteessa useaan eri suureeseen, kuten aikaan, kulutettuihin polttoainelitroiin tai matkaan. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin keskitytty hiukkasten päästökertoimien selvittämiseen hiilidioksidipitoisuutta sekä poltettua polttoainekiloa kohden. Hiukkasten päästökertoimet hiilidioksidia kohden saadaan asettamalla niiden välille lineaarinen riippuvuus (luku 4). Sen sijaan päästökertoimet hiukkasille poltettua polttoainekiloa kohden saadaan laskettua kaavalla

$$EF(PN)_{\# / kg_{fuel}} = \frac{[PN]_{\# / cm^3} - [PN_{tausta}]_{\# / cm^3}}{[CO_2]_{g / cm^3} - [CO_{2,tausta}]_{g / cm^3}} \cdot EF(CO_2)_{g / kg_{fuel}}, \quad (3.2)$$

jossa  $EF(PN)$  on hiilidioksidin päästökerroin hiukkaslukumäärää kohden,  $[PN]$  mitattu hiukaspitoisuus,  $[PN_{tausta}]$  taustahiukaspitoisuus,  $[CO_2]$  mitattua hiukaspitoisuutta vastaava mitattu hiilidioksidipitoisuus,  $[CO_{2,tausta}]$  taustahiilidioksidipitoisuus ja  $EF(CO_2)$  hiilidioksidin massapäästökerroin poltettua polttoainekiloa kohden. Kaavassa on ilmoitettu alaindekseihin tarvittavat mittayksiköt, joihin mitattu data on muunnettava tuloksen saamiseksi oikeassa suuruusluokassa. [23] Jotta mitatut hiilidioksidin arvot saadaan laskennan kannalta oikeaan muotoon, on ne muunnettava kaavalla

$$c(g / cm^3) = c(ppm) \cdot \frac{M}{V_m} \cdot 10^{-9}, \quad (3.3)$$

jossa  $c$  on aineen pitoisuus eri yksiköissä,  $M$  on aineen moolimassa ja  $V_m$  on kaasun molaarinen tilavuus, joka on normaaliolosuhteissa (NTP) 24,04 l. Mitatut hiukkasten lukumääräpitoisuudet ovat jo yksiköltään oikein, kun ne on muunnettu ELPI-laitteiden antamista impaktoriasteiden virroista lukumääräkonsentraatioiksi.

Mittauksissa saatua dataa käsiteltäessä on huomiotava myös taustahiukkaset. Päästökertoimia laskettaessa ei voida olettaa kaikkien hiukkasten olevan peräisin liikenteestä,

vaan on huomioitava myös hiukkasten luonnollinen taustapitoisuus. Taustapitoisuus hiukkasille voidaan laskea sellaisesta mittauskohdasta, missä mittalaitteisto havaitsee vain taustahiukkasia. Tällaisia kohtia mittauksen aikana ovat esimerkiksi pitkät sillat, jossa tuuli puhaltaa näytteenottolinjaan ainoastaan taustahiukkasia mereltä. Tässä tutkimuksessa hiukkasten taustapitoisuuden selvittämiseen vuodelle 2015 on käytetty mittauksia Tanskan ja Ruotsin välillä sijaitsevalta Juutinrauman sillalta sekä vuodelle 2017 mittauksia Tanskan ja Ruotsin väliseltä lauttamatkalta. Taustapitoisuuksien laskemiseksi käytetyt osuudet on esitetty kuvassa 3.3



**Kuva 3.3.** Osuudet, joilta hiukkasten taustapitoisuudet on laskettu eri vuosille

Taustapitoisuuksiksi hiukkasille on vuonna 2015 laskettu noin  $4740 \text{ \#/cm}^3$  ja vuonna 2017 vastaavasti noin  $6270 \text{ \#/cm}^3$ . Hiukkasten taustapitoisuuksia laskettaessa on otettu huomioon myös tuulen suunta. Vuonna 2015 on tuullut koillisesta ja vuonna 2017 etelä-kaakosta, joten molemmilla kerroilla tuuli on tullut selkeästi sivusuunnassa mereltä päin, eikä esimerkiksi suoraan edestä, jolloin liikenteen päästöt olisivat vaikuttaneet virheellisesti taustapitoisuuden laskemiseen.

Hiilidioksidin taustapitoisuuden laskemiseen on sen sijaan käytetty liukuvaa taustapitoisuutta kahden tunnin ajalta, eli aikavälillä mittaushetkestä tunti taaksepäin ja tunti eteenpäin olevia pitoisuuksia. Taustan hiilidioksidipitoisuuden on oletettu muodostuvan näiden kahden tunnin ajalta mitattujen pitoisuuksien viidennestä prosenttiilistä. Tällainen taustapitoisuuksien käsittely on toteutettu sen vuoksi, että vuoden 2017 lauttamatkalta laskettu hiilidioksidin taustapitoisuus on ollut hyvin korkea (426 ppm). Oletettavasti siis lähellä on ollut jokin hiilidioksidilähde, joka on vaikuttanut taustapitoisuuden mittaamiseen. Jotta eri vuosien tulokset olisivat luotettavasti vertailtavissa, on tällainen liukuva taustan laskenta suoritettu myös vuoden 2015 hiilidioksidipitoisuuksille, vaikka kyseiselle vuodelle Juutinrauman sillalta laskettu taustapitoisuus 388 ppm vaikuttaa oikealta.

Saadut taustapitoisuudet vähennetään mitatuista hiukkasten ja hiilidioksidin pitoisuuksista, jotka ovat suurempia kuin saadut taustapitoisuudet. Tällöin päästökertoimia voidaan määrittää pelkästään liikenteen päästöille, eivätkä muut pitoisuuslähteet, kuten teollisuuden kaukokulkeuma tai luonnollinen taustapitoisuus, vaikuta tulokseen vääristävästi. Tämän jälkeen mittausten aikaleimojen avulla etsitään tiettyä hiilidioksidipitoisuutta vastaavat hiukkaspitoisuudet, jolloin hiukkaspitoisuudet saadaan kohdennettua hiilidioksidipitoisuuksia vastaaviksi.

## 4 PIENHIUKKASET POHJOISMAIDEN MOOTTORITEILLÄ

Molemmilla mittauskerroilla on mitattu hiilidioksidipitoisuuksia sekä aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle  $10\text{ }\mu\text{m}$ :n hiukkasia. Vaikka tämän työn painopiste on alle  $2,5\text{ }\mu\text{m}$ :n hiukkasissa, ovat ELPI-laitteet mitanneet hiukkasia noin  $10\text{ }\mu\text{m}$ :iin asti. Kuitenkin eri kokoisten hiukkasten lukumääräpitoisuuksissa  $2,5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$  hiukkasten prosentuaalinen osuus on pieni, noin 1–2 %:a, joten tarkastelu voidaan suorittaa kaikille mitatuille hiukkasille, eivätkä  $2,5\text{ }\mu\text{m}$ :ä suuremmat hiukkaset vaikuta tulokseen vääristävästi.

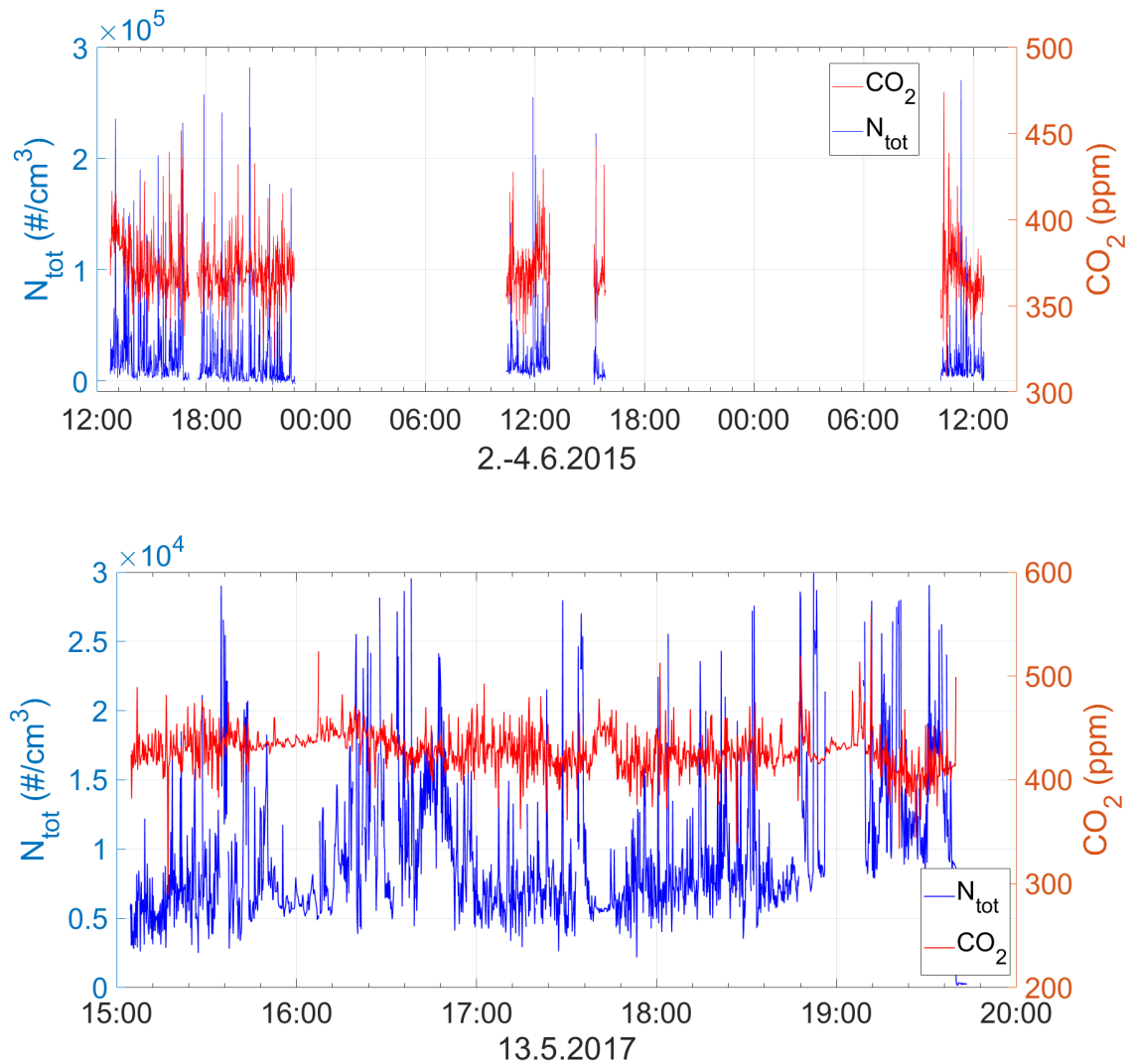
Tutkimuksessa mitattuja hiukkasia voidaan yhdistää mitattuihin hiilidioksidipitoisuuksiin eri tavoin. Tässä tutkimuksessa on keskitytty pelkästään liikenteen tuottamien hiukkasten päästökerrointen selvittämiseen, joten mitatuista taustapitoisuutta korkeammista hiukkasia ja hiilidioksidipitoisuuksista on vähennetty taustapitoisuudet. Tavoitteena on siis tarkastella hiukkaspitoisuuksien eroja taustapitoisuudesta verrattuna hiilidioksidin taustapitoisuuksista eroaviin pitoisuuksiin.

### 4.1 Hiilidioksidi- ja hiukkaspitoisuudet

Tutkimuksessa mukana olleet mittalaitteet mittaavat hiilidioksidi- ja hiukkaspitoisuuksia jatkuvasti niiden ollessa käynnissä. Tutkimuksen ajalta voidaan siis piirtää kuvaaja, jossa hiukkasten kokonaislukumääräpitoisuutta ja hiilidioksidipitoisuutta voidaan tarkastella ajan funktiona, kuten kuvassa 4.1.

Eri vuosille on myös määritetty kokonaisvaltaiset keskimääräiset hiukkaspitoisuudet. Vuonna 2015 keskimääräiset pitoisuudet ovat olleet  $2,0 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$  ja vuonna 2017 puolestaan  $1,4 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$ . Ero on melko pieni, ja sen on voinut aiheuttaa esimerkiksi vuonna 2015 suoritettut mittaukset Tanskassa, joita ei vuonna 2017 ole tehty. Tanskan vuosikeskiarvo liikenteen hiukkaspitoisuuksille on korkeampi kuin Ruotsissa ja Suomessa [1], joten ero keskimääräisissä hiukkaspitoisuuksissa vaikuttaa loogiselta. Ero on myös selkeästi havaittavissa kuvasta 4.1, sillä vuoden 2015 mittauksissa hiukkaspitoisuudet nousevat selkeästi korkeammalle.

Keskimääräiset hiukkaspitoisuudet on voitu määrittää myös liikenteen tuottamille hiukkaspitoisuuksille, eli niille hiukkasten lukumäärille, jotka ovat esiintyneet kohonneiden hiilidioksidipitoisuuksien aikana. Nämä pitoisuudet ovat vuoden 2015 osalta  $3,8 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^2$



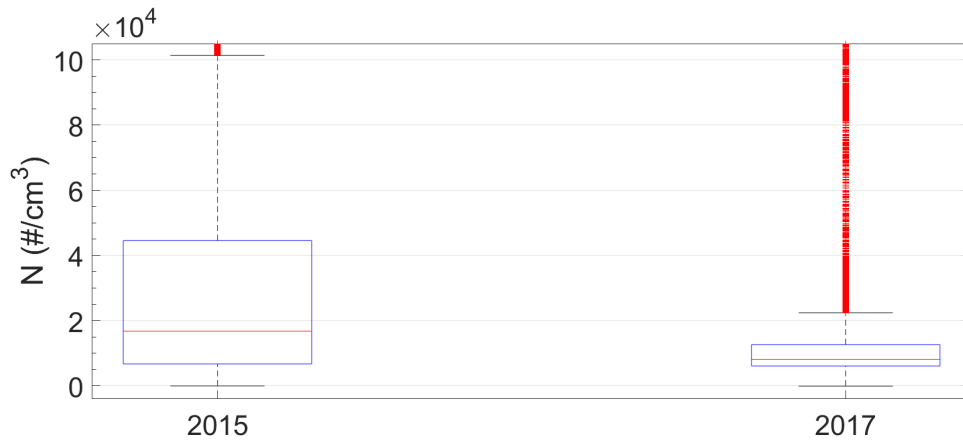
**Kuva 4.1.** Hiilidioksidin ja hiukkasten esiintyminen eri mittauskerroilla

**Taulukko 4.1.** Hiukkaspitoisuuden tunnuslukuja eri vuosille

	2015	2017
Keskiarvo	$2,0 \cdot 10^4 \#/\text{cm}^3$	$1,4 \cdot 10^4 \#/\text{cm}^3$
Mediaani	$8,9 \cdot 10^3 \#/\text{cm}^3$	$7,4 \cdot 10^3 \#/\text{cm}^3$
$\sigma_g$	4,14	2,36

ja vuoden 2017 osalta  $2,2 \cdot 10^4 \#/\text{cm}^2$ . Näidenkin pitoisuuksien ero on havaittavissa kuvasta 4.1.

Lisäksi on tutkittu hiukkaspitoisuuden tunnuslukuja vuosien välisten erojen määrittämiseksi. Kaikille mitatuille hiukkaspitoisuuksille on määritetty pitoisuuden keskiarvo, mediaani sekä laskettu kullekin vuodelle geometrinen keskihajonta  $\sigma_g$ . Lasketut tunnusluvut on esitetty taulukossa 4.1. Tunnuslukuja on myös esitetty graafisesti kuvassa 4.2.



**Kuva 4.2.** Hiukkaspitoisuuden tunnuslukuja

Kuvassa 4.2 on esitetty punaisella vaakaviivalla mediaani, sininen laatikko kuvaa mitattujen pitoisuuksien 25–75 %:n persentilejä ja laatikon ulkopuoliset harmaat vaakaviivat äärimmäisiä mitattuja arvoja. Lisäksi kuvaan on merkitty yksittäiset pitoisuuspiikit punaisella.

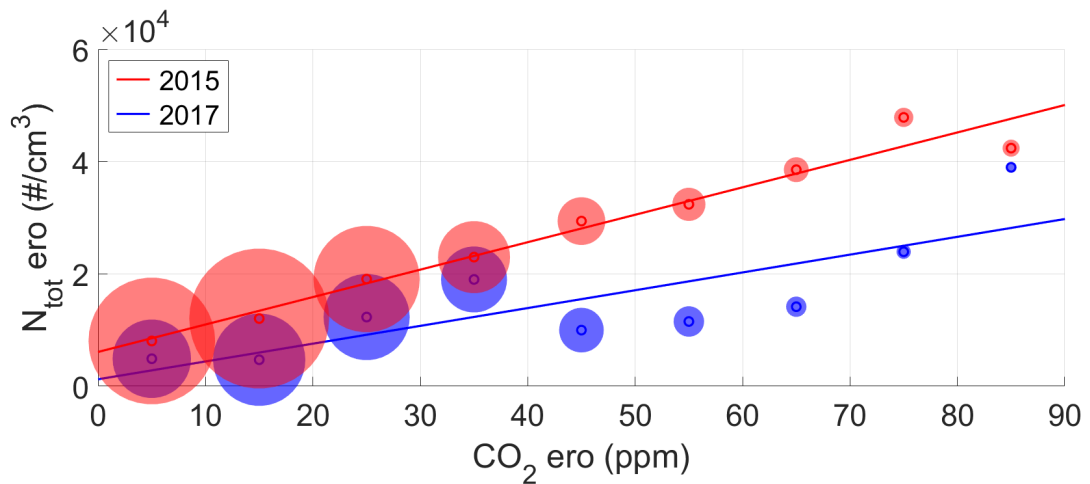
## 4.2 Päästökertoimet

Mitattujen hiukas- ja hiilidioksidipitoisuuksien suhdetta voidaan mallintaa lineaarisella sovitteella. Tässä tutkimuksessa on keskitytty hiukkasten ja hiilidioksidin taustapitoisuuksista eroaviin pitoisuuksiin niin, että havaituista pitoisuuksista on vähennetty taustapitoisuuksien arvo, jonka jälkeen saatujen pitoisuuksien välille on muodostettu lineaarinen riippuvuus. Tällainen käsittely auttaa siihen, ettei päästökertoimia mitatessa mukaan tule ylimääräisiä päästölähteitä, vaan selville saadaan pelkästään liikenteen päästökertoimet. Kuvaan 4.3 on piirretty liikenteen päästöpitoisuuksien riippuvuudet molemmilta mittausvuosilta.

Hiilidioksidin päästökerroin poltettua polttoainekiloa kohti on bensiinille  $3134 \text{ g/kg}_{\text{fuel}}$  ja dieselille  $3161 \text{ g/kg}_{\text{fuel}}$ , joista keskiarvona voidaan laskea polttoaineiden yhteiseksi hiilidioksidipäästökertoimeksi  $3147,5 \text{ g/kg}_{\text{fuel}}$  [24]. Hiilidioksidin päästökertoimen avulla voidaan laskea päästökerroin hiukkasille käytettyä polttoainekiloa kohti, kun sovitteiden kulmakertoimet saadaan kuvasta 4.3. Vuonna 2015 tehtyjen mittausten perusteella kulmakertoimeksi, eli hiukkasten päästökertoimeksi hiilidioksidipitoisuutta kohden, on saatu  $488,5 \pm 88,7 \text{ \#/cm}^3 \text{ ppm}$ , kun taas vuonna 2017 tehtyjen mittausten perusteella kulmakertoimen arvoksi on saatu  $317,0 \pm 206,0 \text{ \#/cm}^3 \text{ ppm}$ . Virherajat on laskettu Matlabin sovitteelle antamasta 95 % luottamusvälistä.

Saatujen kulmakertoimien perusteella voidaan laskea hiukkasten päästökerroin käytettyä polttoainekiloa kohti käyttäen kaavoja 3.2 ja 3.3. Vuoden 2015 mittauksista saadaan hiukkasten päästökertoimeksi  $8,4 \cdot 10^{14} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$  ja vastaavasti vuoden 2017 mittauksista





**Kuva 4.3.** Hiukkaskonsentraatioiden erot hiilidioksidipitoisuuden erojen funktiona, mitauspisteiden suhteellista lukumäärää kuvattu läpinäkyvillä ympyröillä

$3,7 \cdot 10^{14}$  #/kg<sub>fuel</sub>. Saadut tulokset ovat hieman pienempiä kuin aiemmin toteutetuista samankaltaisista tutkimuksista saadut tulokset, mutta sijoittuvat silti lähes samaan kokoluokkaan [25, 26, 27]. Virherajoihin päästökertoimet voidaan sijoittaa vuoden 2015 osalta välille  $6,9 \cdot 10^{14}$ – $9,9 \cdot 10^{14}$  #/kg<sub>fuel</sub> ja vuoden 2017 osalta välille  $1,9 \cdot 10^{14}$ – $9,0 \cdot 10^{14}$  #/kg<sub>fuel</sub>, jolloin päästään jo lähemmäksi aiemmissa tutkimuksissa havaittuja hiukkaspitoisuuksia.

Eroon aiempien tutkimusten ja tämän tutkimuksen välillä vaikuttaa mitä luultavammin niiden välillä kulunut aika, sillä vanhempien tutkimusten ja tämän tutkimuksen mittausten välillä on lähes 10 vuotta. Ajan kuluessa autokannat ovat muuttuneet, ja uusia autoja rajoittavat tiukemmat päästöluokitukset, kuten Euroopassa Euro 6 -päästöluokitus. Lisäksi vertailut tutkimukset ovat mittausympäristöiltään tästä tutkimuksesta, sillä Yli-Tuomi et al. [26] on mitattu Helsingin ympäristössä, kun taas Ban-Weiss et al. [25] suorittamat mittaukset on toteutettu tunnelissa. Lähimmäksi mittausympäristöltään sijoittuu Kittelson et al. [27] suorittama tutkimus Minnesotan moottoriteillä, mutta ajallisten ja maantieteellisten erojen vuoksi ero tämän ja kyseisen tutkimuksen välillä on ymmärrettävä. Taulukossa 4.2 on vertailtu tässä ja muissa samankaltaisissa tutkimuksissa saatuja arvoja.

Tässä tutkimuksessa lasketut päästökertoimet sen sijaan ovat selkeästi samassa kokoluokassa, mutta vuoden 2015 mittauksista laskettu arvo on kuitenkin suurempi. Ero voi johtua autokannan uudistumisesta, sillä uudet autot tuottavat vähemmän pienhiukkasia, tai esimerkiksi vallitsevista sääolosuhteista. Olisi kuitenkin ollut perusteltua olettaa, että vuoden 2017 mittauksessa hiukkasia olisi ollut enemmän, sillä sää on ollut aurinkoinen. Vuonna 2015 sen sijaan sää on ollut sateinen, ja on havaittu, että sateella ilman hiukkaspitoisuudet ovat pienemmät [26].

Erot mittauksissa ovat siis syntyneet luultavasti muiden tekijöiden kuin sään vaikutuksesta, kuten esimerkiksi mittalaitteiden eroista. Eri vuosina suoritettavat mittaukset on mitattu eri laitteilla, sillä vuonna 2015 hiukkasten lukumääräjakaumaa on mitattu ELPI-laitteella, kun taas vuonna 2017 sitä on mitattu ELPI+-laitteella, joka on kehittyneempi versio ELPI-

**Taulukko 4.2.** Vertailua tässä ja muissa tutkimuksessa saatujen arvojen välillä

Tutkimus	Aika	Paikka	Mittaus- tyyppi	Keskimäär. lkm.pitoisuus	Päästökerroin
Tämä tutkimus	2017	Ruotsi, Tanska	Mobiili	$1,4 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$	$0,37 \cdot 10^{15} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$
Tämä tutkimus	2015	Ruotsi, Suomi, Tanska	Mobiili	$2,0 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$	$0,84 \cdot 10^{15} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$
Ban-Weiss et al. [25]	2006	California, USA	Tunneli	(3,2–29) $\cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$	(0,39–3,3) $\cdot 10^{15} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$
Yli-Tuomi et al. [26]	2003	Helsinki	Mobiili	$20 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$	$8,3 \cdot 10^{15} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$
Kittelson et al. [27]	2000	Minnesota, USA	Mobiili	$4 \cdot 10^4 \text{ \#/cm}^3$	(2,2–11) $\cdot 10^{15} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$

laitteesta. Eri laitteiden käyttö mittausvuosien välillä saattaa siis olla vähintään osasyllinen saatujen tulosten eroihin.

Mittausvuosien tulosten eroja selittävät ehkä osaltaan myös reittivalinnat, sillä vuonna 2015 on ajettu myös Tanskassa, jossa liikenteen hiukkaspitoisuudet ovat korkeammat [1], kun taas vuonna 2017 mittaukset ovat keskittyneet lähinnä Ruotsin alueelle. Luultavammin vuosien väliset eroavaisuudet kuitenkin syntyvät autokantojen eroista, sekä satunnaisista mittaukseen vaikuttaneista tekijöistä.

## 5 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia liikenteen pienhiukkaspäästöjä moottoriteillä Pohjoismaissa. Tavoitteena oli määrittää pienhiukkasten päästökertoimet kohonneita hiilidioksidipitoisuuksia sekä poltettuja polttoainekiloja kohden. Eri vuosilta saatuja tuloksia oli tarkoitus vertailla keskenään sekä muihin samankaltaisiin aiemmin suoritettuihin tutkimuksiin. Lisäksi tavoitteena oli pohtia syitä mahdollisille eroille eri mittausvuosien välillä.

Tämän tutkimuksen tuloksena saatiin vuodelle 2015 päästökertoimeksi  $8,4 \cdot 10^{14} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$  ja vuodelle 2017 vastaavasti  $3,7 \cdot 10^{14} \text{ \#/kg}_{\text{fuel}}$ . Saadut päästökertoimet sijoittuivat lähelle toisiaan, mikä oli odotettavaa. Vertailussa muihin samankaltaisiin tutkimuksiin tämän tutkimuksen päästökertoimet olivat alhaisempia kuin muissa tutkimuksissa saadut. Eroja saattoivat aiheuttaa esimerkiksi autokannan uudistuminen vanhempien mittausten sekä tämän tutkimuksen mittausten välillä, sillä aikaa oli kulunut eri tutkimusten välillä lähes 10 vuotta. Myös uudet tiukemmat päästöluokitukset, kuten Euro-päästöluokitukset, ovat luultavasti vaikuttaneet päästökertoimien pienemiseen ainakin Euroopan alueella. Eroja saattoivat aiheuttaa myös erilaiset mittausympäristöt, sillä tässä tutkimuksessa on keskitytty lähinnä mittaamaan liikenteen päästöjä muualla kuin asutuskeskuksissa. Vertaillessa tämän tutkimuksen tuloksia muihin samankaltaisiin tutkimuksiin mittaustavaltaan samankaltaisin tutkimus on ollut Kittelson et al. [27] suorittama tutkimus, jossa mittaukset on suoritettu moottoriteillä, Näiden mittausten välillä on kuitenkin suuria ajallisia sekä maantieteellisiä eroja, joten erot mittausten välillä ovat loogisia.

Tässä tutkimuksessa laskettujen päästökertoimien eroihin vaikuttivat mahdollisesti erilaiset sääolosuhteet, mittausreittien valinta sekä kahden vuoden ero mittausten välillä. Vuoden 2015 mittauksia suoritettiin Tanskassa, jossa keskimääräiset liikenteen  $\text{PM}_{2.5}$ -päästöt ovat korkeammat kuin Ruotsissa ja Suomessa [1], mikä saattoi osaltaan vaikuttaa vuosien välisiin eroihin. Vuonna 2017 mittaukset sen sijaan suoritettiin lähes ainoastaan Ruotsissa. Lisäksi päästökertoimien eroihin saattoivat vaikuttaa eri mittauskerroilla käytetyt eri mittalaitteet, joiden mittaustarkkuudet olivat mahdollisesti eroavat.

Tutkimuksen perusteella ei voida sanoa täysin varmasti, mitä liikenteen hiukkaspäästöille on tapahtumassa tai tapahtunut vuosien mittaan, mutta ainakin päästökertoimien trendi näyttäisi olevan laskeva, jos tässä tutkimuksessa saatuja päästökertoimia vertaillaan aiempina vuosina saatuihin. Eroja voivat kuitenkin synnyttää erilaiset mittausympäristöt, esimerkkinä kaupunki- tai moottoritieympäristöt, joissa päästökertoimet voivat poiketa toisistaan huomattavastikin, ja erilaisissa mittausympäristöissä saatuja tuloksia ei voida täysin vertailla keskenään.

Keskimääräisten kokonaishiukkaslukumäärien pitoisuus näyttää vaihtelevan suurestikin eri tutkimusten välillä. Tässä tutkimuksessa vuodelta 2015 keskimääräinen pitoisuus on ollut  $1,9 \cdot 10^{14} \text{ \#/cm}^3$  ja vuodelta 2017  $1,6 \cdot 10^{14} \text{ \#/cm}^3$ , joten näiden pitoisuuksien osalta voidaan olettaa niiden laskevan. Vertailtaessa muihin samankaltaisiin tutkimuksiin, näyttää keskimääräinen hiukkaspitoisuus kuitenkin heittelevän, eikä tutkimusten välillä voida löytää tiettyä trendiä.

Tämän tutkimuksen ongelmia olivat eri mittalaitteiden käyttö eri mittauskerroilla, jolloin saatuja tuloksia ei voida täysin luotettavasti vertailla. Vaikka käytetyt mittalaitteet olivat molemmat ELPI-laitteita, niiden välillä oli mahdollisesti eroja esimerkiksi keräystehokkuudessa ja toiminnassa. Toisaalta tämä on erona muihinkin samankaltaisiin tutkimuksiin verrattaessa, joten voidaan olettaa, että eri mittauskertojen tulokset ovat ainakin suuntaa antavasti vertailtavissa. Hankaluuksia aiheutti myös joiltakin osin pieni datamäärä, sillä esimerkiksi vuonna 2017 ajettu mittausreitti on ollut melko lyhyt. Ongelmana saattoi lisäksi olla se, että molemmat tässä tutkimuksessa käytetyt mittaukset suoritettiin kevätkesällä, jolloin hiukkaspitoisuudet ovat yleensä huipussaan. Hiukkasmäärää tähän vuodenaikaan nostaa yleensä siitepöly, tiehen jääneen hiekoituksen irtoaminen sekä yleisesti kasvukauden alkaminen. Tämän takia mittauksissa on saatettu havaita sellaisiakin hiukkasia, jotka eivät ole suoraan liikenteestä peräisin, ja päästökertoimet on täten arvioitu korkeammaksi kuin ne todellisuudessa ovat.

Mittausvirheitä saattoi aiheuttaa lisäksi mittauksen tyyppi, sillä mittaukset suoritettiin mobiililaboratoriolla, jolloin ajonaikainen tärinä on saattanut vaikuttaa mittalaitteisiin. Myös lämpötilan vaihtelut voivat vaikuttaa mittalaitteiston toimintaan, ja lämpötila on saattanut kohota huomattavastikin auton takaosassa, johon itsekin lämpöä tuottavat mittalaitteet oli sijoitettu. Ylipäättään saatuihin lopputuloksiin on voinut vaikuttaa moni tekijä. Tämän vuoksi ehkä tärkeimmäksi nousevat saadut päästökertoimet virherajoineen eivätkä niin yksittäiset saadut lukuarvot, sillä virherajoineen päästökertoimet antavat parasta tietoa sen hetkisestä päästökertoimien tilasta.

Tutkimuksen luotettavuutta olisi voitu parantaa esimerkiksi minimoimalla mittalaitteisiin vaikuttavat häiriötekijät. Tämä tarkoittaa sitä, että mittalaitteiden lämpötilavaihtelut olisi pidetty mahdollisimman pienenä ja mittalaitteiden tärinää olisi rajoitettu. Tällaiset ongelmat ovat kuitenkin aina mobiilimittausten ongelmia, joten niiden minimoiminen on haastavaa. Lisäksi tutkimuksissa hiilidioksidin taustapitoisuus olisi voitu mitata useammassa kohtaa erikseen tarkemman tuloksen saamiseksi. Tällöin taustapitoisuutta ei olisi tarvinnut laskea tuntikeskiarvoina. Hiukkasten taustapitoisuudelle olisi voitu tehdä sama, sillä arviointi silloilta tai muilta vastaavilta osuuksilta on aina hieman virhealtista.

Suoritettua tutkimusta olisi voitu kehittää vielä pidemmälle, esimerkiksi laskemalla vuoden 2015 päästökertoimet eri maissa mitatusta datasta itsenäisesti. Tällöin ongelmaksi olisi ehkä noussut liian vähäinen datamäärä eri maille. Ruotsin läpiajosta data olisi luultavasti riittänyt vuodelta 2015, mutta Suomen ja Tanskan osalta mitatut reitit olivat melko lyhyitä. Tämän vuoksi tutkimuksessa päädyttiin tutkimaan päästökerrointa kaikkien maiden tasoilla, eikä erikseen. Tutkimusta olisi voitu laajentaa myös ottamalla mukaan muis-

takin mittalaitteista saatua dataa, mutta tällöin työn laajuus olisi saattanut kasvaa liian suureksi.

Tässä tutkimuksessa tutkittuja päästökertoimia olisi mielenkiintoista selvittää myös jatkossa samoilla mittausalueilla, jotta voitaisiin nähdä miten päästökertoimet mahdollisesti vuosien kuluessa muuttuvat. Olennaista olisi suorittaa jatkomittaukset samaan vuodenaikaan, jotta eri vuosien päästökertoimia olisi mielekästä vertailla.

On pidettävä mielessä, että liikenteen päästöt eivät ole ongelma ainostaan kaupunkialueilla, vaan aiheuttavat terveys- ja ympäristöhaittoja myös moottoriteillä. Kuten johdannossa mainittiin, tämä tutkimus on yksi harvoja moottoriteiden päästökertoimiin keskittyvistä tutkimuksista. Tulevaisuudessa jatkotutkimuksille on siis tarvetta.

## LÄHTEET

- [1] *Annual mean PM<sub>2.5</sub> concentrations observed at traffic stations, 2016*. 22. marraskuuta 2016. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/annual-mean-pm2-5-concentration-7> (viitattu 10.03.2019).
- [2] *Air Quality Guidelines: Global Update 2005 : Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulfur Dioxide*. WHO, 2006.
- [3] *Health effects of particulate matter*. WHO, 2013.
- [4] W. C. Hinds. *Aerosol Technology*. John Wiley & Sons, 1999.
- [5] O. Geiss, J. Barrero-Moreno, S. Tirendi ja D. Kotzias. Exposure to Particulate Matter in Vehicle Cabins of Private Cars. *Aerosol and Air Quality Research* 10.6 (2010), 581–588.
- [6] D. B. Kittelson. Engines and nanoparticles: a review. *Journal of Aerosol Science* 29.5–6 (1998), 575–588.
- [7] T. Lanki. Kevätpöly ja terveys. *Tie & Liikenne* 82.3 (2012), 9–10.
- [8] G. Hoek, B. Brunekreef, S. Goldbohm, P. Fischer ja P. A. van den Brandt. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *The Lancet* 360.9341 (2002), 1203–1209.
- [9] D. W. Dockery, C. A. Pope III, X. Xu, J. Spengler, J. Ware, M. Fay, B. Ferris ja F. Speizer. An association between air pollution and mortality in six US cities. *The New England Journal of Medicine* 32.24 (1993), 1753–1759.
- [10] C. A. Pope III, M. J. Thun, M. M. Namboodiri, D. W. Dockery, J. S. Evans, F. E. Speizer ja C. W. Heath Jr. Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 151.3 (1995), 669–674.
- [11] *Air Pollution*. 1. lokakuuta 2017. URL: <https://ourworldindata.org/air-pollution> (viitattu 12.04.2019).
- [12] S. C. Anenberg, L. W. Horowitz, D. Q. Tong ja J. J. West. An Estimate of the Global Burden of Anthropogenic Ozone and Fine Particulate Matter on Premature Human Mortality Using Atmospheric Modeling. *Environmental Health Perspectives* 118.9 (2010), 1189–1195.
- [13] B. Alfoldy, B. Giechaskiel, W. Hofmann ja Y. Drossinos. Size-distribution dependent lung deposition of diesel exhaust particles. *Journal of Aerosol Science* 40.8 (2009), 652–663.
- [14] A. Peters, S. von Klot, M. Heier, I. Trentinaglia, A. Hörmann, H. E. Wichmann ja H. Löwel. Exposure to Traffic and the Onset of Myocardial Infarction. *The New England Journal of Medicine* 351.17 (2004), 1721–1730.
- [15] S. Fuzzi, U. Baltensperger, K. Carslaw, S. Decesari, H. D. van der Gon, M. C. Facchini, D. Fowler, I. Koren, B. Langford, U. Lohmann, E. Nemitz, S. Pandis, I.

- Riipinen, Y. Rudich, M. Schaap, J. G. Slowik, D. V. Spracklen, E. Vignati, M. Wild, M. Williams ja S. Gilardoni. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15.14 (2015), 8217–8299.
- [16] O. Schmid ja T. Stoeger. Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung. *Journal of Aerosol Science* 99 (2016), 133–143.
- [17] J. Yli-Ojanperä, J. Kannosto, M. Marjamäki ja J. Keskinen. Improving the Nanoparticle Resolution of the ELPI. *Aerosol and Air Quality Research* 10.4 (2010), 360–366.
- [18] *ELPI+ User Manual ver. 1.12*. Dekati Ltd. 2011.
- [19] J. Keskinen, K. Pietarinen ja M. Lehtimäki. Electrical low pressure impactor. *Journal of Aerosol Science* 23.4 (1992), 353–360.
- [20] M. Marjamäki, J. Keskinen, D.-R. Chen ja D. Y. H. Pui. Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI). *Journal of Aerosol Science* 31.2 (2000), 249–261.
- [21] M. Marjamäki, M. Lemmetty ja J. Keskinen. ELPI Response and Data Reduction I: Response Functions. *Aerosol Science and Technology* 39.7 (2005), 575–582.
- [22] A. Järvinen, M. Aitoma, A. Rostedt, J. Keskinen ja J. Yli-Ojanperä. Calibration of the new electrical low pressure impactor (ELPI+). *Journal of Aerosol Science* 69 (2014), 150–159.
- [23] J. Beecken, J. Mellqvist, K. Salo, J. Ekholm, J.-P. Jalkanen, L. Johansson, V. Litvinenko, K. Volodin ja D. A. Frank-Kamenetsky. Emission factors of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particles from ships in Neva Bay from ground-based and helicopter-borne measurements and AIS-based modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15.9 (2015), 5229–5241.
- [24] *Yksikköpäästötaulukossa esitettyjen polttoaineiden tunnusluvut 2016*. 2. lokakuuta 2017. URL: <http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/indexe.htm> (viitattu 11.06.2019).
- [25] G. A. Ban-Weiss, M. M. Lunden, T. W. Kirchstetter ja R. A. Harley. Size-resolved particle number and volume emission factors for on-road gasoline and diesel motor vehicles. *Journal of Aerosol Science* 41.1 (2010), 5–12.
- [26] T. Yli-Tuomi, P. Aarnio, L. Pirjola, T. Mäkelä, R. Hillamo ja M. Jantunen. Emissions of fine particles, NO<sub>x</sub>, and CO from on-road vehicles in Finland. *Atmospheric Environment* 39.35 (2005), 6696–6706.
- [27] D. Kittelson, W. Watts ja J. Johnson. Nanoparticle emissions on Minnesota highways. *Atmospheric Environment* 38.35 (2004), 9–19.